

草地沙化度对补播地八角外观性状及繁殖策略的影响

银彩羽¹, 曾晓琳¹, 游明鸿², 刘金平^{1*}, 穆文涛¹

(1. 西华师范大学生命科学学院, 四川 南充 637009; 2. 四川省草原科学研究院, 四川 成都 611731)

摘要:【目的】为沙化治理、草地复壮及“四库”建设提供技术支撑, 以提升青藏高原沙化高寒草甸生产力。【方法】分别在4个沙化度(未沙化、轻度、中度和重度)草地上补播地八角, 在465 d后, 通过测定构件性状、生物量结构及繁殖分配等指标, 研究草地沙化度对补播地八角外观性状及繁殖策略的影响。【结果】沙化度影响地八角叶、茎、根等性状, 随沙化度加重, 分枝数、根长、根数、根体积增加, 株高显著降低($P < 0.05$)。中度沙化可显著增加复叶数量、茎长度、茎径和根径($P < 0.05$), 中度沙化时叶、茎、根、花的绝对生物量均为最大, 重度沙化可显著增加小叶数量而抑制茎长。沙化度显著影响地八角花穗数、花数、果数和种子数($P < 0.05$), 对荚果长及种子千粒重无显著影响。沙化度显著影响地八角克隆繁殖与有性繁殖指标($P < 0.05$), 随沙化度克隆繁殖能力降低。轻度沙化繁殖分配和繁殖指数最大, 中度沙化繁殖效率指数最大, 重度沙化克隆效率指数最大。【结论】地八角通过形态可塑性、生物量分配和繁殖权衡, 形成与沙化度相应的外观株丛结构、生长方式及繁殖策略。地八角可作为抗沙固沙草种, 在中、重度沙化草地植被修复或重建中推广应用。

关键词:地八角; 沙化草地; 补播; 繁殖策略; 生态生产力

中图分类号:S812 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)06-0163-07

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2024.06.018



草地沙化引起土壤养分流失、生产力减退、系统结构破坏、生态功能丧失^[1-2], 高海拔、低积温的青藏高原沙化高寒草甸自我更新能力差, 因此, 保护、修复或重建沙化草地植被是急需解决的问题。补播禾草可快速提高草原植被的高度、盖度、密度^[3], 可提升植被的物种多样性、功能群结构及草地生产性能^[4-6], 增加土壤含水量、持水性和有机质含量^[7-8], 但对全氮含量的影响较小^[9]。禾草受自身生物学特点与生态适应性限制, 尤其禾草株高依赖氮肥的生长特点, 使单独补播禾草改良土壤能力不足^[10]。豆科草类根系较深且常共生固氮根瘤, 可增加土壤肥力和水土保持能力, 补播

豆科草类可提高沙化草地再生植被的稳定性、功能性与生态生产力。筛选、驯化、利用拓展性能好、适应范围广、分生再生能力强的乡土豆科草种^[11], 是修复沙化草地植被和恢复生态生产力的基础与关键。

地八角(*Astragalus bhotanensis*)又名不丹黄芪、土牛膝、球花紫云英、地皂角, 为豆科黄芪属多年生草本植物, 在海拔3 000~4 000 m的高寒地区广泛分布, 根系发达, 茎斜生或匍匐, 覆盖能力和繁殖能力强^[12], 具抗寒、抗旱、抗瘠、耐酸能力, 是沙丘中自然生长的防沙治沙植物^[13]。关于地八角的研究集中于引种驯化^[11]、繁殖栽培^[12]、水分利用策略^[14]及根际菌株特性^[15]等方面, 但沙化草地补播地八角的相关研究较少。本研究以4个沙化度草地上补播的地八角为材料, 通过测定根、茎、叶、花性状及生物量累积与分配比等指标, 分析不同沙化度下植株数量指数及株丛结构, 研究沙化度对地八角构件性状及繁殖策略的影响, 探究地八角对沙化生境的适应方式和治沙潜力,

收稿日期:2023-11-14; 修回日期:2024-03-20

基金资助:四川省交通运输科技项目(2019-ZL-19)

作者简介:银彩羽(1998-), 女, 四川遂宁人, 硕士研究生。

E-mail:970046675@qq.com

*通信作者。E-mail:jpgg2000@163.com

为防风治沙植物筛选、沙化草地治理、生态系统修复提供科学依据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况

试验在四川草原科学研究院红原县沙化实验基地进行,该地区地理位置 $102^{\circ}32' E, 32^{\circ}46' N$,为大陆性高原温带季风气候,海拔3497 m,年均温 $1.1^{\circ}C$,极端高温 $23.5^{\circ}C$,极端低温 $-33.8^{\circ}C$,年均降水量738 mm,相对湿度71%,年均积温 $865^{\circ}C$,年辐射量

$(20.93\sim 29.30)\times 10^6 KJ/m^2$ 。

1.2 试验设计

参考天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标标准^[16],选取未沙化(盖度90%)、轻度沙化(盖度70%)、中度沙化(盖度45%)和重度沙化(盖度10%)草地各 $20 m^2, 0\sim 20 cm$ 土壤理化性状见表1。

2021年5月,不同沙化度草地各设3个 $2.0 m\times 2.0 m$ 试验小区,齐地刈割后,均匀补播地八角种子400粒/小区,密度为100粒/ m^2 ,覆土厚度1 cm。播后465 d,进行指标测定。

表1 草地土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of grassland soil

沙化程度	土壤容重/ ($g\cdot cm^{-2}$)	土壤含水量/%	有效氮/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效磷/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	有效钾/ ($mg\cdot kg^{-1}$)	有机质/ ($g\cdot kg^{-1}$)
未沙化	1.02 ± 0.22^d	56.58 ± 1.37^a	231.51 ± 19.04^a	16.12 ± 6.56^a	142.36 ± 3.56^a	5.85 ± 0.12^a
轻度	1.36 ± 0.21^c	25.67 ± 2.01^b	185.64 ± 23.15^b	15.63 ± 1.39^b	142.37 ± 12.48^a	4.26 ± 2.14^b
中度	1.64 ± 0.32^b	18.76 ± 1.98^c	89.23 ± 1.28^c	12.06 ± 0.93^c	87.63 ± 9.54^b	2.45 ± 2.28^c
重度	1.94 ± 0.29^a	12.13 ± 1.15^d	47.02 ± 2.36^d	10.34 ± 0.88^d	32.15 ± 3.12^c	0.85 ± 2.34^d

注:表中同列不同小写字母表示沙化度间差异显著($P<0.05$),表中数值为平均值 \pm 标准差,下表同。

1.3 测定项目及方法

构件性状^[14]:每小区随机取10株,挖取、清洗、拭干后,测羽状复叶叶数、叶宽、叶长,选由上而下第3羽状复叶的小叶数、小叶宽、小叶长;测株高、分枝数、茎长、茎径;测根长(最长根)、根数(侧根)、根体积(排水法测定)及根径(主根);测花穗数、花数、花穗柄长;测荚果数、荚果长、种子数/荚果、千粒重。

生物量^[3]:把根、茎、叶、花等构件分离,分别装袋, $105^{\circ}C$ 下杀青0.5 h, $75^{\circ}C$ 下烘至恒重,称干重为绝对生物量。

计算公式:总生物量=各构件生物量的和;

相对生物量=某部分生物量/总生物量 $\times 100\%$

繁殖性状计算公式^[17]:

克隆繁殖指数=分枝数/总生物量

克隆繁殖能力=茎生物量/地上生物量 $\times 100\%$

繁殖分配=花生物量/总生物量 $\times 100\%$

繁殖指数=花生物量/非繁殖器官生物量

繁殖效率指数=花数/总生物量

1.4 数据分析

采用SPSS 19.0软件进行单因素方差分析,并用SNK法对测定数据进行多重比较,以平均值和标准误差标识测定结果。

2 结果与分析

2.1 草地沙化度对补播地八角构件性状的影响

2.1.1 营养器官 草地沙化度显著影响补播地八角,复叶长度、小叶的长度和宽度($P<0.05$)。轻、中度沙化时复叶性状均显著大于未沙化时($P<0.05$),重度沙化时复叶数量和宽度与未沙化时无显著差异,而复叶长度和小叶数量和长度均大于未沙化时。中度沙化时补播地八角的复叶数为23.45片/株、小叶数为28.43片/复叶,且复叶和小叶长度和宽度均显著高于其他沙化度。沙化度对叶性状影响大小为小叶数量 $>$ 复叶长度 $>$ 小叶长度 $>$ 复叶数量 $>$ 小叶宽度 $>$ 复叶宽度(表2)。

随沙化度加重,株高逐渐降低,分枝数渐次增加,茎径在轻度沙化时增加而重度沙化时下降,茎长在中度沙化时增加而重度沙化时降低($P<0.05$)。轻度沙化对茎长影响较小,显著降低株高而增加茎径和分枝数。中度沙化时茎径达1.50、cm茎长达40.70 cm,为未沙化时的2.34倍和1.59倍。重度沙化时分枝数是未沙化、轻、中度的3.73倍、2.94倍和1.23倍。沙化度对茎性状影响为分枝数 $>$ 株高 $>$ 茎长 $>$ 茎径(表3)。

表2 草地沙化度对地八角叶性状的影响

Table 2 Effects of grassland desertification on the of *A. bhotanensis* leaves

沙化度	复叶			小叶		
	数量	长度/cm	宽度/cm	数量	长度/cm	宽度/cm
未沙化	12.35±1.24 ^c	2.97±0.21 ^d	1.03±0.02 ^b	15.31±1.21 ^d	0.45±0.02 ^c	0.42±0.01 ^b
轻度	18.75±2.41 ^b	6.37±0.12 ^b	1.33±0.13 ^b	23.39±2.32 ^b	0.67±0.07 ^b	0.33±0.03 ^c
中度	23.45±1.05 ^a	9.20±0.58 ^a	2.27±0.12 ^a	28.43±1.42 ^a	1.05±0.09 ^a	0.52±0.10 ^a
重度	12.64±2.02 ^c	4.35±0.06 ^c	1.03±0.03 ^b	19.62±3.45 ^c	0.58±0.03 ^b	0.31±0.01 ^c

表3 草地沙化度对地八角茎和根性状的影响

Table 3 Effects of grassland desertification on the characteristics of *A. bhotanensis* stems and roots

沙化度	株高/cm	茎径/cm	茎长/cm	分枝数	根长/cm	根数	根体积/mL	根径/cm
未沙化	23.25±0.75 ^a	0.67±0.05 ^d	25.67±2.11 ^b	8.67±1.24 ^d	18.67±0.85 ^d	13.57±0.57 ^d	1.04±0.05 ^d	0.55±0.04 ^c
轻度	15.17±1.60 ^b	0.97±0.88 ^c	24.70±0.70 ^b	11.00±1.16 ^c	26.60±1.59 ^c	22.04±3.22 ^c	1.37±0.30 ^c	0.54±0.03 ^c
中度	12.71±2.04 ^c	1.50±0.26 ^a	40.70±6.24 ^a	26.33±1.45 ^b	31.77±1.33 ^b	34.01±2.08 ^b	4.67±0.38 ^b	1.17±0.11 ^a
重度	3.47±0.43 ^d	1.32±0.32 ^b	11.40±1.47 ^c	32.33±2.03 ^a	42.53±1.08 ^a	61.33±1.76 ^a	5.93±0.26 ^a	0.97±0.18 ^b

草地沙化度对补播地八角的根长、根数、根径和根体积均有影响。随沙化度加重,根数、根长和根体积逐渐增加,根径先增后降低。轻度沙化可显著增加根长和根数($P<0.05$),而对根径影响较小。中度沙化时根径最大,重度沙化时根长是未沙化、轻、中度时的2.28倍、1.60倍和1.34倍,根数是未沙化、轻、中度时的4.52倍、2.78倍和1.80倍,根体积是未沙化、轻、中度时的5.70倍、4.33倍和1.27倍。沙化度对根性状影响为根数>根体积>根长>根径(表3)。

2.1.2 繁殖器官 随沙化度加重,花穗数、花穗柄长、花数先增后降。轻度沙化显著增加花穗数和花数

($P<0.05$),中度沙化时花穗数、花穗柄长、花数均达最大。重度沙化时花穗数是未沙化、轻、中度时的95.96%、61.83%和19.32%,花数是未沙化、轻、中度时的159.23%、53.71%和15.75%(表4)。

沙化度影响地八角的荚果数和种子数(表4),对荚果长和种子千粒重影响较小。随沙化度加重,荚果数和种子数均表现为先增后降($P<0.05$)。未沙化地八角的繁殖器官数量均低于沙化草地,沙化度对繁殖器官影响为花数>花穗数>荚果数>花穗柄长>种子数>荚果长>千粒重(表4)。

表4 草地沙化度对地八角花性状的影响

Table 4 Effects of grassland desertification on the characteristics of *A. bhotanensis* flowers

沙化度	花穗数/ (株·个 ⁻¹)	花穗柄长/cm	花数/ (朵·株 ⁻¹)	荚果数/ (个·株 ⁻¹)	荚果长/cm	种子数/荚果	种子千粒重/g
未沙化	8.06±3.12 ^d	7.17±0.33 ^b	87.69±4.32 ^d	16.37±0.96 ^c	2.33±0.01 ^a	3.82±0.08 ^c	4.42±0.15 ^a
轻度	28.03±3.47 ^b	7.19±0.41 ^b	259.99±9.65 ^b	34.65±3.24 ^b	2.36±0.01 ^a	4.73±0.08 ^b	4.46±0.12 ^a
中度	89.67±10.138 ^a	7.97±0.32 ^a	686.37±12.57 ^a	68.52±1.52 ^a	2.43±0.02 ^a	6.17±0.03 ^a	4.39±0.08 ^a
重度	17.33±2.60 ^c	3.50±0.32 ^c	139.63±6.25 ^c	31.21±4.21 ^b	2.28±0.06 ^a	5.87±0.07 ^a	4.43±0.09 ^a

2.2 草地沙化对地八角生物量的影响

沙化度显著影响叶、茎、根、花的绝对生物量($P<0.05$)(表5),随沙化度加重,叶、茎、根、花的绝对生物量均先增后降($P<0.05$),均在中度沙化时最大。未沙化草地的地八角构件绝对生物量和单株总生物量均低于沙化草地。重度沙化叶、茎、根、花的绝对生物量,分别降为中度的49.55%、72.89%、74.73%、

46.19%。

沙化度显著影响叶、根和花的相对生物量($P<0.05$)(表5),随沙化度加重,叶和花的相对生物量均先增后降($P<0.05$),茎和根相对生物量先降后增($P<0.05$)。沙化时茎的相对生物量达最大值,轻度沙化时叶和花相对生物量最大,重度沙化时根相对生物量最大,而叶则最小。

沙化度对花的绝对生物量影响最大,而对根的对生物量影响最大,总体绝对对生物量影响大于相对生物量。沙化度对生物量影响大小为:根相对生物

量>花绝对生物量>叶绝对生物量>根绝对生物量>花相对生物量>叶绝对生物量>茎绝对生物量>茎相对生物量。

表5 草地沙化度对地八角生物量结构的影响

Table 5 Effects of grassland desertification on the biomass structure of *A. bhotanensis*

沙化度	绝对生物量/g				相对生物量/%			
	叶	茎	根	花	叶	茎	根	花
未沙化	0.73±0.21 ^d	1.01±0.02 ^c	0.62±0.06 ^d	0.48±0.03 ^d	25.70±0.21 ^b	35.56±0.47 ^a	21.83±0.21 ^c	16.90±0.12 ^c
轻度	1.72±0.08 ^b	1.59±0.56 ^b	0.74±0.03 ^c	1.95±0.11 ^b	28.67±0.08 ^a	26.50±0.56 ^b	12.33±0.03 ^d	32.50±2.11 ^a
中度	2.24±0.12 ^a	2.14±0.21 ^a	2.81±0.09 ^a	2.23±0.10 ^a	23.78±0.12 ^b	22.72±0.21 ^c	29.83±0.09 ^b	23.67±2.28 ^b
重度	1.11±0.06 ^c	1.56±0.07 ^b	2.10±0.07 ^b	1.03±0.05 ^c	19.14±0.06 ^c	26.89±0.07 ^b	36.21±0.07 ^a	17.76±0.05 ^e

2.3 草地沙化度对地八角繁殖效率的影响

沙化度影响地八角克隆繁殖与有性繁殖指标(表6)。随沙化度加重,克隆效率指数和克隆繁殖能力均先降后增,有性繁殖分配、繁殖指数先增后降,繁殖效率指数先降后增再降。地八角可依据沙化度分配和权衡克隆繁殖和有性繁殖的投入,未沙化克隆繁殖能力最大而有性繁殖最低,即以克隆繁殖为主。轻度沙化繁殖分配和繁殖指数最大而克隆繁殖最低,即以有性繁殖为主。中度沙化的克隆效率指数和克隆繁殖能力与轻度沙化无显著差异,繁殖分配和繁殖指数则显著低于轻度沙化($P<0.05$),但繁殖效率指数达最大值,即以降低繁殖生物量分配,提高单位生物

量花数的方式应对中度沙化。重度沙化克隆繁殖投入显著大于轻中度沙化,有性繁殖投入小于轻中度沙化($P<0.05$),克隆效率指数达5.57,而繁殖效率指数仅24.07,即通过增加单位生物量分枝数而减少花数的方式应对重度沙化。

沙化度影响地八角繁殖投入方向与数量,但4个沙化度均未放弃克隆生长或有性生长,均形成株丛且开花结果(表3),均产生成熟且饱满种子(表4)。未沙化与重度沙化克隆繁殖能力、繁殖分配和繁殖指数无差异,但未沙化繁殖效率指数是重度沙化的2.45倍。沙化度对地八角繁殖指标影响为繁殖效率指数>克隆效率指数>繁殖分配>繁殖指数>克隆繁殖能力。

表6 草地沙化度对地八角繁殖效率的影响

Table 6 Effects of grassland desertification on reproductive efficiency of *A. bhotanensis*

沙化度	克隆效率指数/ (number·g ⁻¹)	克隆繁殖能力/%	有效繁殖分配/%	繁殖指数	繁殖效率指数/%
未沙化	3.05±0.16 ^b	45.49±1.19 ^a	16.90±0.12 ^c	20.34±2.33 ^c	59.04±5.76 ^b
轻度	1.83±0.09 ^c	30.22±3.17 ^b	32.50±2.11 ^a	48.15±1.31 ^a	43.33±3.36 ^c
中度	2.01±0.13 ^c	29.59±0.41 ^b	23.67±2.28 ^b	31.01±2.47 ^b	72.86±4.86 ^a
重度	5.57±0.22 ^a	42.16±1.92 ^a	17.76±0.05 ^c	21.59±2.41 ^c	24.07±2.28 ^d

3 讨论

草地沙化表现为植被盖度降低,地面抗冲刷能力和地下根系截流能力下降^[18]。随沙化度增加,土壤砂粒比例不断增加,粘粒和粉粒比例不断下降^[19],蓄水保肥能力强的粘粒和粉粒流失,引起土壤物理、化学和生物学属性的改变^[19]。草地沙化引起土壤粒级组成、质地及土壤中水、养、气、热等非生物类生境因异质性^[19]。本试验中草地沙化使土壤有机质、有效氮、

有效钾、有效磷含量分别下降29.94%~90.69%、19.81%~79.69%。0~38.44%、3.14%~35.86%。尤其轻度沙化引起土壤含水量下降54.63%,中度沙化引起有效氮快速流失,重度沙化引起有效钾快速下降(表1)。不同沙化度间土壤容重、水分和养分含量有差异,尤其轻、中、重度沙化使土壤有机质含量降低了27.18%、58.12%、85.48%,破坏了土壤团聚体组成、数量和稳定性^[20],限制了土壤微生物和酶活性等生物生境。采用齐地刈割撒种的补播方式,不同沙化

草地原有植物种类、株丛类型和分生再生、拓展能力及化感作用能力不同,加之沙化度对土壤种子库种子密度和物种丰富度的影响^[21],决定了不同沙化度草地的生物条件不同。并且沙化度对再生植被群落密度、投影盖度和基盖度及优势种等生物因子影响差异^[22-23],使土壤截留水肥能力与抗侵蚀能力不同,进一步影响非生物生境因子。草地沙化度对非生物及生物生境的影响,使补播的地八角获取资源总量及生存生长面临的现实和潜在竞争力不同。

不同沙化度引起的生境差异,使补播地八角的种子萌发、生根及生长不同,可利用资源及贫瘠和干旱等胁迫发生频度强度也不同。地八角通过极强水分整合能力,水分优先向根和花分配,沙化度对根的水分饱和亏几乎无影响,且花维持较高的水分分配比^[14],使它在4个沙化度上均可完成生活史。通过生长速度、构件性状、生物量配比等表型性状,可反映植物对生境的适应能力与生长策略^[24]。地八角具有极强的形态可塑性,依据生物与非生物生境条件,通过调节根、茎、叶、花等构件性状,形成与生境匹配的生长方式和繁殖策略,通过营养生长和生殖生长有效权衡,保持与生境匹配的克隆繁殖和有性繁殖兼容平衡。未沙化草地土壤含水达56.58%,群落密度和盖度达1324.36株/m²和96.86%^[14],对地八角造成水分胁迫和生长挟持与竞争,使其株高最大而分枝数最低,觅养或逃离器官茎的绝对生物量最高,虽维持较高克隆繁殖能力和繁殖效率指数,但繁殖分配和繁殖指数极低,不利于株丛拓展和种群扩大,可能是未沙化草地中野生地八角分布极少的原因。

生物量优先向减缓或克服胁迫的构件分配,可反映植物对胁迫应对方式和功能的权衡能力^[25]。未沙化草地地八角生物量优先向茎分配,轻度沙化优先向叶和花分配,重度沙化优先向根分配,与前人研究结果相似^[26],表明沙化度造成胁迫种类和强度不同,地八角可依据生境形成相应的生长策略。中度沙化地八角营养器官结构和繁殖器官数量和性状均最优,各构件绝对生物量最大且相对生物量配比最优,繁殖效率指数最高。重度沙化地八角叶相对生物量最低而根相对生物量最高,通过降低叶生物量和含水量及分配比,增加叶片水分饱和亏减缓蒸腾失水^[14],降低根

水分饱和亏增加根数和根长,提高植株的水分利用效率减少重度沙化造成的伤害。

植物常依据生境条件进行生殖权衡,最大限度地利用有限资源来保证生殖生长以完成生活史^[17]。沙化度间代表克隆繁殖的分枝数和代表有性繁殖的花数差异最大,表明不同沙化度地八角采取不同的繁殖策略。重度沙化地八角分枝数最大且匍匐生长,以克隆繁殖为主。中度沙化花穗数、花数及荚果数显著高于其他沙化度,以有性繁殖为主。4个沙化度下地八角均未放弃有性繁殖,尽管繁殖分配、繁殖指数和繁殖效率指数差异显著,因沙化度对花、果含水量和水分分配比影响极小,且水分饱和亏低于营养器官^[14],为开花、授粉和种子发育奠定了稳定的水分基础。受繁殖分配和花数/株限制,沙化度造成荚果数/株和种子数/荚的不同,但种子千粒重无差异,均形成饱满健康种子,为种群更新和物种传播奠定基础。生殖权衡和生长策略是植物通过系列生理生化反应^[17],在生存、生长与生殖间等功能间实现物质转换、能量流动和信息传递的复杂系统性过程,本研究仅分析了沙化度对地八角影响的阶段性结果。有关沙化度对荚果长度和种子千粒重无影响的源库流关系问题,以及沙化度对地八角生理整合方式、竞争力及生态生产力影响等问题,有待于进一步研究。

4 结论

沙化度影响了地八角叶、茎、根、花等性状,地八角通过形态可塑性,形成与沙化度适应的株丛结构和生长方式。沙化度影响地八角总生物量和构件分配比,通过调节叶、茎、根、花的绝对和相对生物量,形成与沙化度适应的生物量结构和抗性基础。沙化度影响地八角克隆繁殖和有性繁殖权衡关系,通过调节分枝数和花数,形成与沙化度适应的克隆繁殖和有性繁殖平衡策略,均可开花结果形成饱满种子。地八角作为乡土豆科草种,对草地沙化度具有极强的适应能力和生长策略,宜在中、重度沙化草地植被修复或重建中推广应用。

参考文献:

- [1] Liu M, Dries L, Heijman W, *et al.* Land tenure reform and grassland degradation in Inner Mongolia, China[J]. *China Economic Review*, 2019, 55: 181-198.

- [2] 罗亚勇,孟庆涛,张静辉,等. 青藏高原东缘高寒草甸退化过程中植物群落物种多样性、生产力与土壤特性的关系[J]. 冰川冻土,2014,36(5):1298-1305.
- [3] 陈子萱,田福平,武高林,等. 补播禾草对玛曲高寒沙化草地各经济类群地上生物量的影响[J]. 中国草地学报,2011,33(4):58-62.
- [4] 王斌,杨彦军,董秀,等. 补播禾草对退化苜蓿草地生产性能及牧草品质的影响[J]. 草地学报,2021,29(3):618-624.
- [5] 杨增增,张春平,董全民,等. 补播对中度退化高寒草地群落特征和多样性的影响[J]. 草地学报,2018,26(5):1071-1077.
- [6] 孙伟,刘玉玲,王德平,等. 补播羊草和黄花苜蓿对退化草甸植物群落特征的影响[J]. 草地学报,2021,29(8):1809-1817.
- [7] 姬万忠,王庆华. 补播对天祝高寒退化草地植被和土壤理化性质的影响[J]. 草业科学,2016,33(5):886-890.
- [8] 吴宛萍,马红彬,陆琪,等. 补播对宁夏荒漠草原植物群落及土壤理化性状的影响[J]. 草业科学,2020,37(10):1959-1969.
- [9] 范博,王占义,刘鹏博,等. 生物炭基肥和补播对荒漠草原植物群落和土壤养分的影响[J]. 草地学报,2023,31(3):618-624.
- [10] 刘卓. 补播禾草对退化苜蓿草地生产性能、营养品质及土壤性质的影响[D]. 银川:宁夏大学,2020:9-16.
- [11] 张英俊,周冀琼,杨高文,等. 退化草原植被免耕补播修复理论与实践[J]. 科学通报,2020,65(16):1546-1555.
- [12] 陈培燕,赵相勇. 野生地八角繁殖方法及栽培技术[J]. 草业与畜牧,2012(1):34-35.
- [13] 李莹,曾晓琳,游明鸿,等. 5种川西北沙化地草本植物生态适应策略的差异性[J]. 草业科学,2016,33(5):843-850.
- [14] 羊勇,曾晓琳,陈渤,等. 草地沙化程度对地八角水分分配策略及抗性生理的影响[J]. 草业科学,2022,39(4):688-696.
- [15] 陆瑞霞,王小利,李显刚,等. 地八角根际溶磷菌溶磷能力及菌株特性研究[J]. 中国草地学报,2012,34(4):101-108.
- [16] 苏大学,张自和,陈佐忠,等. 天然草地退化、沙化、盐渍化的分级指标 GB 19377-2003[S]. 北京:中国标准出版社,2003.
- [17] 徐晓霞,刘金平,游明鸿,等. 遮阴和干旱对苁草克隆生长和有性繁殖及权衡关系的影响[J]. 草业学报,2019,28(2):121-132.
- [18] 杨元武,李希来,周旭辉,等. 高寒草甸植物群落退化与土壤环境特征的关系研究[J]. 草地学报,2016,24(6):1211-1217.
- [19] 郭碧花,张雪梅,刘金平,等. 坡度对高寒草甸公路护坡土壤性状及沙化表现的影响[J]. 草业学报,2022,31(11):15-24.
- [20] 周丽,张德罡,负旭江,等. 退化高寒草甸植被与土壤特征[J]. 草业科学,2016,33(11):2196-2201.
- [21] 赵晓男,唐进年,樊宝丽,等. 高寒地区不同程度沙化草地土壤种子库特征[J]. 草业科学,2020,37(12):2431-2443.
- [22] 王合云,郭建英,董智,等. 退化程度对大针茅草原植物群落结构特征及物种多样性的影响[J]. 干旱区资源与环境,2016,30(3):106-111.
- [23] 任雪,郭碧花,刘金平,等. 土壤沙化度对再生植物群落特征及草地生产能力的影响[J]. 草原与草坪,2023,43(2):22-28.
- [24] 郭海燕,刘航江,刘金平,等. 遮阴对藜草构件性状及生物量结构影响的性别差异[J]. 草业科学,2018,35(10):2481-2488.
- [25] 谢瑞娟,张小晶,刘金平,等. 干旱和遮阴对苁草构件形态及生物量分配的影响[J]. 草业科学,2017,34(7):1496-1505.
- [26] 郭茉莉,孙淑英. 植物生殖分配及其适应环境策略研究进展[J]. 北方农业学报,2016,44(6):99-103.

Effects of desertification degree on the appearance traits and reproductive strategies of *Astragalus bhotanensis* in reseeding grassland

YIN Cai-yu¹, ZENG Xiao-lin¹, YOU Ming-hong², LIU Jin-ping^{1*}, MU Wen-tao¹

(1. School of Life Sciences, China West Normal University, Nanchong 637009, China; 2. Academy of Sichuan Grassland Science, Chengdu 611731, China)

Abstract: 【Objective】 To provide technical support for desertification control, grassland revitalization, and the construction of "four reservoirs", aimed at enhancing the ecological productivity of desertified alpine meadows on the Qinghai Tibet Plateau. 【Method】 The seeds of *Astragalus bhotanensis*, a leguminous plant, were reseeded in grasslands with four levels of desertification (non sandy, light, moderate and heavy desertification). Key indicators such as component traits, biomass structure, and reproductive allocation were measured to examine differences in appearance traits and reproductive strategies of reseeded *A. bhotanensis*. 【Result】 The level of desertification significantly influenced the traits of leaves, stems, roots, and flowers of *A. bhotanensis* ($P < 0.05$). The number of branches, root length, root number, and root volume increased significantly with desertification severity, while the plant height decreased with the desertification degree ($P < 0.05$). Moderate desertification significantly enhanced compound leaf number, stem length, stem diameter, and root diameter ($P < 0.05$), resulting in the highest absolute biomass for leaves, stems, roots, and flowers. Severe desertification increased the number of small leaves but inhibited stem length. The degree of desertification significantly affected panicle, flower, fruit, and seed numbers of *A. bhotanensis* ($P < 0.05$), but had no significant effect on pod length and seed thousand grain weight. Reproductive and sexual indicators of *A. bhotanensis* were also significantly affected by desertification ($P < 0.05$). Clone reproductive ability decreased with the desertification degree. Mild desertification yielded the highest reproductive allocation and reproductive index, moderate desertification achieved the highest reproductive efficiency index, and severe desertification recorded the highest cloning efficiency index. 【Conclusion】 *A. bhotanensis* could form an external plant cluster structure, growth mode, and reproductive strategy corresponding to desertification degrees by morphological plasticity, biomass allocation, and reproductive balance. As a sand-resistant and sand-stabilizing leguminous grass, *A. bhotanensis* demonstrates significant potential for vegetation restoration and reconstruction of moderately to severely desertified grasslands.

Key words: *Astragalus bhotanensis*; desertification grassland; reseeding; reproductive strategies; ecological productivity

(责任编辑: 靳奇峰)